

**БІОТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 576.8, 581.13

Н.Б. Голуб<sup>1</sup>  
Д.І. Жураховська<sup>2</sup>  
В.Л. Чумак<sup>3</sup>

**ВПЛИВ ЯКІСНОГО СКЛАДУ СИРОВИНИ НА ПРОДУКУВАННЯ ВОДНЮ  
МІКРООРГАНІЗМАМИ**

<sup>1,2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056

<sup>3</sup>Національний авіаційний університет  
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680  
E-mails: <sup>1</sup>golubnb@ukr.net; <sup>2</sup>dashkina13@ukr.net; <sup>3</sup>chumak@gmail.com

*Проаналізовано вплив складу целюлозовмісної сировини на вихід водню, який одержано з використанням угруповання мікроорганізмів у процесі анаеробного бродіння в мезофільному режимі. Максимальний вихід водню 128 г Н<sub>2</sub>/кг целюлози одержано із застосуванням соломи ячменю – сировини, що містить найбільшу кількість геміцелюлози. Показано, що в міру старіння культури відбувається перехід з маслянокислого типу бродіння до ацетоно-бутилового, що супроводжується значним зменшенням виходу водню. Вихід водню залежить від попереднього оброблення сировини, внаслідок якого руйнується лігніно-целюлозний каркас і знешкоджуються метаногенні бактерії.*

**Ключові слова:** анаеробне бродіння; біореактор; водень; мікроорганізми; целюлозовмісна сировина.

**Постановка проблеми**

Антропогенне навантаження на довкілля внаслідок переробки та використання викопних видів палива, а також зменшення їх запасів спонукають спільноту до пошуку нових відновлювальних джерел енергії. Одним з таких енергоносіїв є водень, оскільки продуктом його згоряння є вода. Водень можна використовувати як однокомпонентний енергоносіє, так і як добавка до моторних палив [6].

Запаси сировини є невичерпними, оскільки, крім води, з якої водень можна одержати шляхом електролізу, сировиною можуть бути всі викопні види палива, різні види біомаси, тверді та рідкі відходи виробництв, що містять органічні речовини, побутові відходи тощо. Можливість використання такої широкої сировинної бази зменшує енергетичну залежність країн-імпортерів вуглеводневої сировини.

Натепер такі технології одержання водню, як парова конверсія метану або його часткове окиснення, газифікація вугілля, піроліз, електроліз є енергозатратними, і відповідно водень, одержаний за такими методами, має високу собівартість. Для одержання водню використовується 20–25% щорічного світового видобутку природного газу [7]. Тільки 62% водню виробляється як цільовий продукт, решта 38% є побічним продуктом

нафтопереробки, коксохімії, виробництв хлору та каустичної соди тощо.

Дослідження та розроблення економічно ефективних методів одержання водню з використанням відновлювальної сировини та відходів є актуальною проблемою, яка безпосередньо впливає на економіку і політику всіх країн, що імпортують вуглеводневі енергоносії.

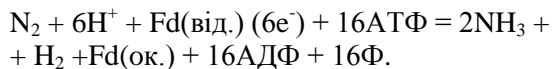
**Аналіз попередніх досліджень і публікацій**

Пропонується одержувати водень з використанням мікроорганізмів [8; 11; 13]. На відміну від хімічних біологічних процеси відбуваються у водному середовищі за невисокої температури та атмосферного тиску, що потребує істотно менших енергетичних витрат. До того ж ці методи добре підходять для децентралізованого виробництва енергії в невеликих установках на місцях, де утворюються відходи, тому зменшуються витрати на транспортування.

Можливі два шляхи біологічного добування водню: анаеробний ферментативний процес і фотосинтетичний процес [14]. Фотосинтетичний процес здійснюється або біофотолізом, або фотоферментацією.

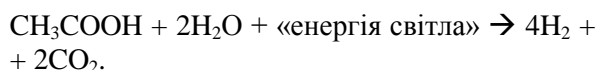
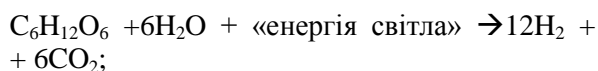
Головною проблемою прямого біофотолізу є одночасне одержання кисню, що робить процес продуктування водню вибухонебезпечним.

Одержання водню за рахунок непрямого біофотолізу ціанобактеріями потребує великих витрат енергії клітиною, оскільки процес добування одного молю водню з використанням нітрогенази потребує 16 молей АТФ за реакцією:



Спостерігаються низькі швидкості продукування та вихід водню, що є неприйнятним для технологічних процесів [12].

У процесі фотоферментації органічні сполуки під дією фотосинтетичних бактерій, наприклад, роду *Rhodobacter* (*Rhodobacter sphaeroides* SH<sub>2</sub>C та іншими пурпурними бактеріями) перетворюються на водень за рівняннями [14]:



Швидкість виділення водню, яка була досягнута, становила 145–160 ммоль/год на літр [2].

Найбільш перспективним, з нашого погляду, є одержання водню в процесі темного бродіння, оскільки процес не потребує освітлення, відбувається з використанням різноманітних субстратів, у тому числі різноманітних відходів. Відсутність аерації значно зменшує енергетичні витрати [5; 10].

**Мета роботи** – дослідження впливу якісного складу відходів сільськогосподарської сировини на процес продукування водню угрупуванням мікроорганізмів.

### Матеріали та методи дослідження

Процес виділення водню мікроорганізмами з використанням целюлозовмісних субстратів здійснювали в анаеробних мезофільних умовах за температури 35–40 °С у термостаті сухоповітряному ТС-80М у періодичному режимі. Ступінь анаеробності середовища відстежували за зміною забарвлення розчину резазурину марки х.ч. (0,15 г/л), який додавали в кількості 1 мл/л.

Процес одержання біоводню проводили в реакторах об'ємом 500 мл, заповненим на 70% інокулятом, водою та відповідним субстратом.

Асоціацію анаеробних мікроорганізмів відбирали з компостного ґрунту. Для інактивації метаногенних бактерій суспензію ґрунту (50 г ґрунту та 250 мл водопровідної відстояної води) нагрівали 20 хв на водяній бані (90 °С). Одержаний таким чином інокулят вводили в реактор у

співвідношенні з водою 1:5. Для повної інактивації метаногенних бактерій запуск реакторів проводили в атмосфері повітря.

Фільтрувальний папір (біла стрічка) використовували для контролю як джерело целюлози. Щоб запобігти дефіциту живильних речовин у контрольному досліді до реактора на 350 мл водопровідної відстояної води додавали [3]

1,5 г NaNH<sub>4</sub>HPO<sub>4</sub>;

0,5 г KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>;

0,5 г K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>;

0,4 г MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O;

0,1 г NaCl;

сліди MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O;

сліди FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O;

2,0 г CaCO<sub>3</sub>.

Вибір сировини був зроблений, виходячи з масштабів вирощування сільськогосподарських культур. Як сировину використовували відходи ячменю, кукурудзи, рапсу, соняшнику, які попередньо подрібнювали до розмірів 1–3 мм та прогрівали паром на водяній бані протягом 60 хв. Морфологію клітин вивчали методами світлової мікроскопії за допомогою мікроскопа XSP-139TP зі збільшенням 1000×. Забарвлення за Грамом проводили згідно із загальноприйнятою методикою [3].

Склад газу, що синтезувався в процесі мікробної деструкції органічних сполук харчових відходів, визначали за допомогою газового хроматографа ЛХМ-8-МД за стандартною методикою [7].

### Результати дослідження

Із целюлозовмісної сировини найбільш вигідними для одержання водню є відходи сільського господарства – солома, листя та стебла різних рослин, кукурудзяні качани тощо. Хімічний склад сировини залежить від виду рослин, клімату, способів збирання, обмолоту, зберігання й інших чинників. Так, у соломі з різної сировини міститься 20–45 % клітковини та інших складних вуглеводів, що важко деструктуються, 2–6 % протеїну, 1,2–2 % жиру, 4–15 % золи [15].

Стінка клітини має сітчасту структуру з взаємозв'язаних молекул целюлози з довгим ланцюгом, наповнену іншими вуглеводнями (геміцелюлозами), а також лігніном і різними екстрактними речовинами. Міжклітинною речовиною є в основному пектати кальцію та магнію, а в клітинах нагромаджуються жири, сапоніни, флавоноїди, каротини, смоляні речовини тощо. До складу золи входять головним чином солі лужних та лужноземельних металів. Якісний склад відходів наведено в табл. 1 [9].

Таблиця 1. Склад різних типів целюлозовмісних відходів

Вид сировини	Вміст компонентів, %					
	Полісахариди, що легко гідролізуються (геміцелюлози)	Полісахариди, що важко гідролізуються (целюлоза)	Лігнін	Зольні речовини	Сирий протеїн	БЕР
Листя кукурудзи	30	22–27	16–18	5,7	11,3	56
Соняшник (листя, стебло)	11	27–40	20–26	15,1	12,7	44–50
Солома ріпаку	16–28,7	23,5–37,7	23–28	7,2–13,6	17,5–27	44–56
Солома ячменю	44	37	11	5–8	2,3–7,4	14

Зміну виходу водню залежно від часу, що відповідає фазі росту мікроорганізмів-продуцентів водню для різних видів сировини, показано на рис. 1.

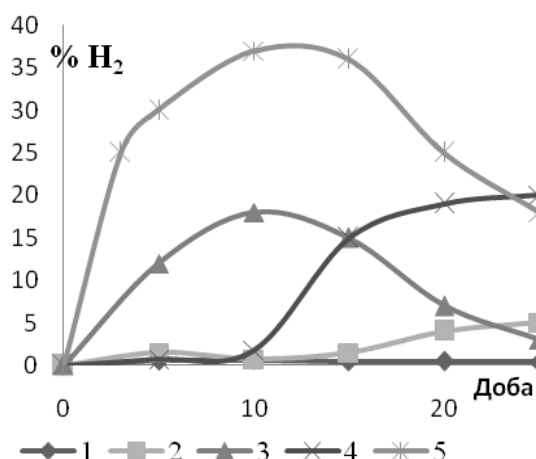


Рис. 1. Зміна виходу водню залежно від часу культивування:

- 1 – кукурудза;
- 2 – ріпак;
- 3 – соняшник;
- 4 – фільтрувальний папір;
- 5 – ячмінь

Найменший час лаг-фази у мікроорганізмів спостерігається для відходів із соломи ячменю. У цьому випадку стабільне виділення водню відбувається на третю добу ферментації.

Деструкція чистої целюлози відбувається майже втричі повільніше, ніж соломи з ячменю.

Пояснити це можна тим, що солома ячменю містить значну кількість геміцелюлози – полісахаридів зі значно коротшими ланцюгами, що розчинні у воді. Завдяки цьому збільшується кількість доступних поживних речовин для продукування водню.

Попереднє оброблення сировини парою також робить більш доступними поживні речовини. Солома ячменю містить удвічі менше протеїнів

порівняно з іншими видами сировини, що також впливає на швидкість продукування водню, оскільки мікроорганізмам для продукування водню необхідні вільні амінокислоти, причому в угрупованні мікроорганізмів кількість видів, що використовують амінокислоти для продукування водню, значно менша, ніж мікроорганізмів, що використовують цукри. При цьому солома ячменю містить інші легкодоступні низькомолекулярні речовини, розклад яких забезпечує продукування водню.

Утворення водню угрупованням мікроорганізмів з використанням відходів наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Вихід водню  $H_2$ , %

Відходи	Доба				
	5	10	15	20	25
Кукурудза (стебла, листя)	0,57	0,645	0,49	0,45	0,4
Соняшник (головки, стебла)	12,2	17,8	15,4	7,4	3,4
Солома ріпаку	0,16	0,7	1,59	4,25	5
Солома ячменю	30,3	36,45	36	24,3	19,8
Фільтрувальний папір	0,21	0,591	13,5	24,3	23,5

У випадку використання соломи ріпаку продукування водню гальмується відсутністю доступу мікроорганізмів до вільної целюлози, що можна пояснити збільшенням кількості лігніну у сировині – будовою структури лігноцелюлозних волокон, що утворюють жорсткий каркас, що є причиною підвищення виходу водню з 15-ї доби після повільної деструкції волокон лігноцелюлози.

Попереднє кислотне оброблення сировини руйнує кристалічну структуру целюлози та лігніну, що приводить до зменшення часу до початку продукування водню, оскільки полегшує доступ до поживних речовин мікроорганізмам. Але вихід водню на рівні 5% на 25-ту добу ставить відходи ріпаку до непродуктивної сировини для одержання водню.

Відходи соняшнику містять менше лігніну, ніж відходи ріпаку. Водночас кількість геміцелюлози значно менша відносно як відходів ячменю, так і ріпаку. Цим можна пояснити як менший вихід водню, так і початок зниження продукування водню на 15-ту добу.

Відходи кукурудзи, як і ріпак, містять значну кількість безазотистих екстракційних речовин і меншу кількість лігніну. З точки зору якісного складу сировини (30% геміцелюлози) пояснити дуже незначну кількість утворення водню неможливо.

Незначний вихід водню для відходів кукурудзи може бути пов'язаний з залишковим впливом пестицидів та інсектицидів, якими була оброблена сировина в процесі росту і які є інгібіторами ферментів.

Для більшості мезофільних мікроорганізмів-продуцентів водню характерним є відновлення фередоксину за рахунок НАДН за участі фередоксин оксидоредуктази [4]. Тому інгібування цього ферменту (гербіцидами) приводить до зменшення виходу водню як у випадку використання сировини з відходів кукурудзи.

Більша частина біологічного водню при катаболізмі різних субстратів продукується при анаеробному метаболізмі пірувату.

У процесі бродіння утворюються в різних співвідношеннях органічні кислоти (масляна, оцтова, молочна), спирти (бутанол, етанол, 2-пропанол), а також ацетон і газоподібні продукти ( $H_2$  і  $CO_2$ ). Співвідношення кінцевих продуктів бродіння залежить від сировини, умов культивування та віку культури. За даними хроматографічного аналізу рідини у міру старіння культури відбувається перехід з маслянокислого типу бродіння на ацетоно-бутилове, що супроводжується значним зменшенням виходу водню і спостерігається на 20–25-ту добу (табл. 2).

Залежність продукування водню мікроорганізмами від попереднього оброблення сировини показано на рис. 2. Ця залежність підтверджує необхідність термічного оброблення сировини для збільшення виходу водню, під час якого руйнуються не лише волокна лігноцелюлози, а й гинуть метаноутворювальні мікроорганізми, які є споживачами водню, що також підвищує вихід водню. Це підтверджується відсутністю метану в газовій суміші обробленої сировини. Водночас загальна кількість мікроорганізмів-деструкторів органічної сировини залишається постійною і не залежить від попереднього оброблення, що підтверджується кількістю утвореного  $CO_2$ .

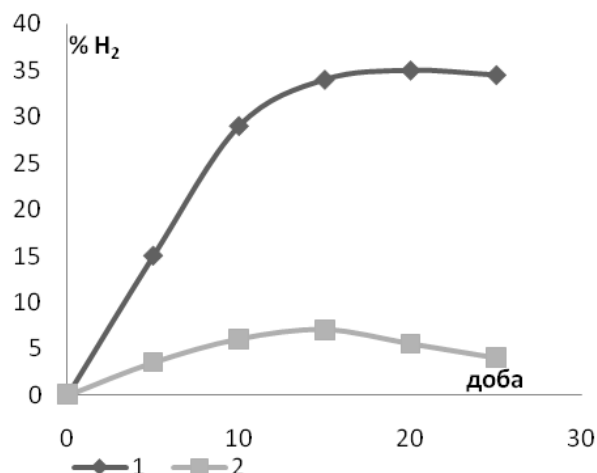


Рис. 2. Залежність продукування водню мікроорганізмами від попереднього оброблення соломи ячменю:

1 – після обробки паром;

2 – без попередньої обробки

Максимальний вихід водню становив 128 г  $H_2$ /кг целюлози на 10-ту добу культивування асоціації мікроорганізмів з використанням соломи ячменю як сировини.

## Висновки

1. Вихід водню у процесі біотехнологічної переробки відходів залежить від лігноцелюлозної структури сировини. Чим більш кристалічна структура та менший вміст геміцелюлози, тим менший вихід водню. На продукування водню мікроорганізмами також впливає наявність безазотистих екстрактивних речовин та сирого протеїну. Зі зменшенням їх вмісту в сировині збільшується вихід водню, що характерно для соломи з ячменю. Найбільш продуктивною сировиною для одержання водню є солома з ячменю.

2. На продукування водню мікроорганізмами впливає попереднє оброблення сировини. Під час термічного оброблення руйнується лігноцелюлозний каркас, що збільшує доступ мікроорганізмів до волокон целюлози, підвищує вихід на поверхню геміцелюлози, а також гинуть метаноутворювальні мікроорганізми, що призводить до збільшення виходу водню.

3. Кінцеві продукти бродіння та їх співвідношення залежать від умов культивування та віку культури. У міру старіння культури відбувається перехід з маслянокислого типу бродіння на ацетоно-бутилове, що супроводжується значним зменшенням виходу водню.

Надалі для підвищення виходу водню потрібно дослідити вплив інгібіторів ферментів побічних шляхів перетворення целюлозної сировини до ацетату. Необхідно також установити вплив попереднього оброблення сировини гербіцидами та пестицидами на розвиток водень-утворювальних мікроорганізмів.

### Література

1. Кузык Б.Н. На пути к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, В.И. Кушлин, Ю.В. Яковец. – Москва: Ин-т эконом. стратегий. 2005. – 160 с.
2. Марков С.А. Биоводород: возможное использование водоростей и бактерий для получения молекулярного водорода / С.А. Марков // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – Т. 45, № 1. – С. 30–35.
3. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук и др.; под ред. А.И. Нетрусова. – Москва: Издат. центр «Академия», 2005. – 608 с.
4. Одержання біоводню в анаеробних процесах / Н.Б. Голуб, Д.І. Жураховська, К.В. Нікуліна, Н.В. Нікуліна // Відновлювальна енергетика, 2009. – № 2. – С. 65.
5. Синицин А.П. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов / А.П. Синицин, А.В. Гусakov, В.М. Черноглазов. – Москва: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.
6. Тарасов Б.П. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее / Б.П. Тарасов, М.В. Лотоцкий // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2006. – Т. L. – С. 1–13.
7. Хроматограф лабораторный ЛХМ–8МД: техническое описание инструкция по эксплуатации. – Москва: Опытный завод «Хроматограф», 1992. – 50 с.
8. Цыганков А.А. Получение водовода биологическим путем / А.А. Цыганков // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2006. – Т. L. – № 6. – С. 33.
9. El-Sakhawy, M.; Ha, M.L. 2007. *Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues*. Carbohydrate Polym. N 67: 1–10.
10. Ganesh, D. Saratale; Shing-Der, Chen; Yung-Chung, Lo; Rijuta, G. Saratale; Jo-Shu, Chang. 2008. *Outlook of biohydrogen production from lignocellulosic feedstock using dark fermentation – a review*. Journal of Scientific and Industrial Research. Vol. 67: 962–979.
11. Lemi, Turker; Selcuk, Gumus; Alper, Tapan. 2008. *Biohydrogen production: molecular aspects*. Journal of Scientific and Industrial Research. Vol. 67: 994–1016.
12. Rozendal, R.A.; Hamelers, H.V.M.; Euverink, G.J.W.; Metz, S.J.; Buisman, C.J.N. 2006. *Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy. N 31: 1632–1640.
13. Souichiro, Kato; Shin, Haruta; Zong, Jun Cui; Masaharu, Ishii; Yasuo, Igarashi. 2005. *Stable Coexistence of Five Bacterial Strains as a Cellulose-Degrading Community*. Appl. Environ. Microbiol. Vol. 71, N 11: 7099–7106.
14. Yongzhen, Tao; Yang, Chen; Yongqiang, Wu. 2007. High hydrogen yield from a two-step process of dark-and photo-fermentation of sucrose / // International journal of hydrogen energy Y. Vol. 32, N 2: 200–206. ISSN: 0360-3199 CODEN: IJHEDX.
15. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Солома>

### References

1. Kuzyk, B.N.; Kushlin, V.I.; Yakovets, Yu.V. 2005. *On the Road to Hydrogen Energy*. Moscow, The Institute of Economic Strategies. 160 p. (in Russian).
2. Markov, S.A. 2007. *Biohydrogen: the possible use of algae and bacteria to produce molecular hydrogen*. Alternative Energy and Ecology. Vol. 45, N 1: 30–35 (in Russian).
3. Netrusov, A.I.; Egorova, M.A.; Zakharchuk, L.M. et al. 2005. *Workshop on microbiology*. Textbooks for high school students. Edited by A.I. Netrusov. Moscow, Publishing Center “The Academy”. 608 p. (in Russian).
4. Golub, N.B.; Zhurahovska, D.I.; Nikulina, K.V.; Nikulina, N.V. 2009. *Biohydrogen production within anaerobic processes*. Renewable Energy. N 2: 65 (in Ukrainian).
5. Sinitsin, A.P.; Gusakov, A.V.; Chernoglazov, V.M. 1995. *Bioconversion of lignocellulosic materials*. Moscow, Moscow State University Press. 224 p. (in Russian).
6. Tarasov, B.P.; Lototsky, M.V. 2006. *Hydrogen Energy: Past, Present and prospects for the future*. Russian chemical journal. Vol. L: 1–13 (in Russian).
7. *Chromatograph laboratory LHM-8MD: technical manual*. R&D Plant “Chromatograph”. Moscow, 1992. 50 p. (in Russian).

8. Tsygankov, A.A. 2006. *Biological hydrogen production*. Russian Journal of Chemistry (Journal of Mendeleev Russian chemical society). Vol. L, N 6: 33 (in Russian).
9. El-Sakhawy, M.; Ha, M.L. 2007. *Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues*. Carbohydrate Polym. N 67: 1–10.
10. Ganesh, D. Saratale; Shing-Der, Chen; Yung-Chung, Lo; Rijuta, G. Saratale; Jo-Shu, Chang. 2008. *Outlook of biohydrogen production from lignocellulosic feedstock using dark fermentation – a review*. Journal of Scientific and Industrial Research. Vol. 67: 962–979.
11. Lemi, Turker; Selcuk, Gumus; Alper, Tapan. 2008. *Biohydrogen production: molecular aspects*. Journal of Scientific and Industrial Research. Vol. 67: 994–1016.
12. Rozendal, R.A.; Hamelers, H.V.M.; Euverink, G.J.W.; Metz, S.J.; Buisman, C.J.N. 2006. *Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy. N 31: 1632–1640.
13. Souichiro, Kato; Shin, Haruta; Zong, Jun Cui; Masaharu, Ishii; Yasuo, Igarashi. 2005. *Stable Coexistence of Five Bacterial Strains as a Cellulose-Degrading Community*. Appl. Environ. Microbiol. Vol. 71, N 11: 7099–7106.
14. Yongzhen, Tao; Yang, Chen; Yongqiang, Wu. 2007. High hydrogen yield from a two-step process of dark-and photo-fermentation of sucrose / // International journal of hydrogen energy Y. Vol. 32, N 2: 200–206. ISSN: 0360-3199 CODEN: IJHEDX.
15. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Солома>

Стаття надійшла до редакції 29.05.2013.

**Голуб Наталія Борисівна.** Кандидат хімічних наук. Доцент.

Кафедра екобіотехнології та біоенергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна.

Освіта: Київський державний університет ім. Т.Г. Шевченка, Київ, Україна (1978).

Напрямок наукової діяльності: біоенергетика, переробка відходів, мікробродорості.

Кількість публікацій: 95.

E-mail: golubnb@ukr.net

**Жураховська Дарина Ігорівна.** Магістр.

Кафедра екобіотехнології та біоенергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна.

Кількість публікацій: 29.

E-mail: dashkina13@ukr.net

**Чумак Віталій Лукіч.** Доктор хімічних наук. Професор.

Завідувач кафедри хімії і хімічної технології, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1972).

Напрямок наукової діяльності: фізична хімія розчинів та електролітів.

Кількість публікацій: 176.

E-mail: chumak@gmail.com

**N. Golub<sup>1</sup>, D. Zhurakhovskaya<sup>2</sup>, V. Chumak<sup>3</sup>. Influence of qualitative composition of raw materials on the production of hydrogen by microorganisms**

<sup>1,2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Peremogy avenue, 37, Kyiv, Ukraine 03056

<sup>3</sup>National Aviation University, Kosmonavta Komarova avenue, 1, Kyiv, Ukraine, 03680

E-mails: <sup>1</sup>golubnb@ukr.net; <sup>2</sup>dashkina13@ukr.net; <sup>3</sup>chumak@gmail.com

The aim was to study the influence of the quality of the agricultural waste materials to the process of producing hydrogen group of microorganisms. Researches were conducted by microbiological and chromatographic methods of analysis. The process of producing hydrogen passes using agricultural waste in anaerobic mesophilic regime for the use of groups of microorganisms. On all types of waste found production of hydrogen. The pretreatment of raw material increases access of microorganisms to nutrients, destruction of lignino-cellulosic frame and decontamination of methanogenic bacterias. The aging of culture leads to transition the butyric type of fermentation to acetone-butyric type, which causes decreasing the yield of hydrogen. The maximum yield of hydrogen was 128 g H<sub>2</sub> per kg of cellulose. It was obtained by using barley straw as raw material, which contains great amount of hemicelluloses.

**Keywords:** agricultural waste; anaerobic fermentation; cellulose; hydrogen; microorganisms.

**Golub Natalia.** Candidate of Chemical Sciences. Associate Professor.

Environmental Biotechnology and Bioenergy Department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

Education: Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine (1978).

Research area: bioenergy, waste recycling, microalgae.

Publications: 95.

E-mail: golubnb@ukr.net

**Zhurahovskaya Darina.** Magister.

Environmental Biotechnology and Bioenergy Department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

Publications: 29.

E-mail: dashkina13@ukr.net

**Chumak Vitalii.** Doctor of Chemical Sciences. Professor.

Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (1972).

Research area: physical chemistry of solutions and electrolytes.

Publications: 176.

E-mail: chumak@gmail.com

**Н.Б. Голуб<sup>1</sup>, Д.И. Жураховская<sup>2</sup>, В.Л. Чумак<sup>3</sup>. Влияние качественного состава сырья на продуцирование водорода микроорганизмами**

<sup>1,2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, Киев, Украина, 03056

<sup>3</sup>Национальный авиационный университет, просп. Космонавта Комарова, 1, Киев, Украина, 03680

E-mails: <sup>1</sup>golubnb@ukr.net; <sup>2</sup>dashkina13@ukr.net; <sup>3</sup>chumak@gmail.com

Проанализировано влияние состава целлюлозосодержащего сырья на выход водорода, полученного с использованием группировки микроорганизмов при анаэробном брожении в мезофильном режиме. Исследовано влияние качественного состава отходов сельскохозяйственного сырья на процесс продуцирования водорода группой микроорганизмов микробиологическими и хроматографическими методами анализа. Рассмотрен процесс получения водорода с использованием отходов сельскохозяйственных производств в анаэробном мезофильном режиме при использовании групп микроорганизмов. На всех видах отходов обнаружено продуцирование водорода. Показано, что предварительная обработка сырья улучшает доступ микроорганизмов к питательным веществам, разрушает лигнино-целлюлозный каркас и обезвреживает метаногенных микроорганизмов. Отмечено, что при старении культуры происходит переход из маслянокислого типа брожения на ацетонобутиловое, что сопровождается значительным уменьшением выхода водорода. Максимальный выход водорода 128 г H<sub>2</sub>/кг целлюлозы получены при использовании соломы ячменя, в химическом составе которого содержится наибольшее количество гемицеллюлозы.

**Ключевые слова:** анаэробное брожение; водород; микроорганизмы; отходы сельскохозяйственных производств; целлюлоза.

**Голуб Наталья Борисовна.** Кандидат химических наук. Доцент.

Кафедра экобиотехнологии и биоэнергетики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.

Образование: Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Киев, Украина (1978).

Направление научной деятельности: биоэнергетика, переработка отходов, микроводоросли.

Количество публикаций: 95.

E-mail: golubnb@ukr.net

**Жураховская Дарина Игоревна.** Магистр.

Кафедра экобиотехнологии и биоэнергетики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.

Количество публикаций: 29.

**Чумак Виталий Лукич.** Доктор химических наук. Профессор.

Заведующий кафедрой химии и химической технологии, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский политехнический институт, Киев, Украина (1972).

Направление научной деятельности: физическая химия растворов и электролитов.

Количество публикаций: 176.

E-mail: chumak@gmail.com